

04;09;12

Порог развития ионизационно-перегревной неустойчивости в плазме безэлектродного СВЧ-разряда

© К.В. Александров, Д.В. Бычков, Л.П. Грачев, И.И. Есаков

Московский радиотехнический институт РАН,
117519 Москва, Россия
e-mail: esakov@dataforse.net

(Поступило в Редакцию 4 сентября 2007 г.)

Описаны эксперименты с импульсным свободно локализованным безэлектродным СВЧ-разрядом в воздухе при давлении, соответствующем восходящей ветви зависимости пробойного поля от давления. Разряд зажигается в сфокусированном квазиоптическом электромагнитном пучке. При нескольких фиксированных уровнях электромагнитного поля в фокусной области пучка путем варьирования давления воздуха определяются его минимальные пороговые значения, при которых в первоначально пространственно-однородном диффузном разрядном плазменном образовании начинает формироваться вытянутый вдоль поля более яркий плазменный канал. В соответствии с существующей теорией это явление трактуется как результат развития в СВЧ разрядной плазме ионизационно-перегревной неустойчивости.

PACS: 52.80.Pi

Введение

Импульсный электрический разряд в воздухе при его давлении p в десятки-сотни торр, зажигаемый в квазиоптическом пучке электромагнитного (ЭМ) излучения, лежащего в СВЧ-диапазоне длин волн λ , реализуется в стримерном виде [1–3]. При длительности ЭМ-импульса с прямоугольной огибающей τ_{pul} в десятки μs он представляет собой пространственно развитую систему тонких плазменных каналов. Эксперименты показали, что такой разряд энергетически эффективно взаимодействует с возбуждающим его ЭМ-полем. Это стимулирует поиск путей его практического применения [4,5] и обуславливает продолжение исследований его свойств.

В настоящей работе описываются экспериментальные результаты, позволяющие уточнить одно из физических явлений в СВЧ разрядной плазме, которое существенно влияет на формирование пространственной структуры такого типа разряда при высоких p .

В работе исследуется разряд в воздухе при уровне электрической составляющей исходного ЭМ-поля в разрядной области E_0 , большем критического пробойного уровня E_{cr} , обеспечивающего самостоятельный, неиницируемый пробой воздуха при его установленном давлении в пренебрежении диффузией электронов из пробойной области и при достаточно больших τ_{pul} . Такой разряд является сугубо динамическим объектом. В своем развитии он проходит ряд последовательных этапов. Их количество зависит от давления воздуха. При сравнительно низких p разряд реализуется в виде плазменного диффузного образования, которое в пространстве может быть разбито на отдельные плазмоиды. В течение τ_{pul} граница области диффузного разряда распространяется навстречу возбуждающему его ЭМ-излучению. С ростом p в разрядных плазмоидах зарождаются вытянутые вдоль E_0 , более яркие, чем основной плазменный фон, разрядные каналы. При больших p они могут удлиняться,

выходить из „материнского“ плазмоида и, продолжая расти, образовывать объемную систему плазменных каналов.

В работе [6] показана граничная линия E_0-p областей, отделяющая диффузные и стримерные типы СВЧ-разряда. При $\lambda = 8.9 \text{ cm}$ эта линия в независимости от E_0 проходит в районе $p \approx 30 \text{ Torr}$. В то же время она достаточно условна. Реально существует некая область, в которой с ростом p диффузный тип разряда постепенно трансформируется в стримерный. Граница этой переходной области, соответствующая наименьшим p , как раз и указывает граничные значения давления воздуха p_{th} при разных E_0 , когда в диффузных плазмоидах начинают образовываться более яркие каналы. Целью настоящей работы является выяснение этих граничных p_{th} при данной λ и в некотором диапазоне E_0 .

В соответствии с теорией [7] появление таких каналов связывается с развитием в первоначально диффузной разрядной плазме ионизационно-перегревной неустойчивости (ИПН). В работе [8] эта теория применена к анализу результатов экспериментов для СВЧ-разряда в квазиоптическом ЭМ-пучке, инициированного проводящим шариком. Она дала хорошее согласие теоретических оценок с результатами экспериментов по инкременту развития данного явления и поперечному размеру фиксируемого ИПН-канала. В то же время в работах [7,8] нет конкретной информации о минимальном граничном p_{th} , при котором начинает развиваться данное явление. Результаты настоящих экспериментальных исследований могут быть использованы при дальнейшем развитии изложенной в этих работах теории.

Условия экспериментов

Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в работе [9]. В установке импульсное с

$\tau_{\text{pul}} = 40 \mu\text{s}$ ЭМ-излучение с $\lambda = 8.9 \text{ cm}$ фокусируется в центре „ЭМ-безэховой“ герметичной камеры.

Излучение в фокусной области имеет ТЕМ-структуру поля и линейно поляризовано. В этой области вдоль вектора распространения ЭМ-волны Π по оси пучка поле E_0 имеет два максимума. Расстояние между ними равно 3 см. Величина поля в середине между максимумами равна примерно $0.9E_0$. В обе стороны от фокусной области поле плавно спадает. В области фокуса в поперечном сечении ЭМ-пучка поле имеет примерно гауссово распределение с максимумом на оси пучка. При этом характерный размер его спада вдоль вектора E_0 равен 5.2 см, а поперек — 2.5 см. Окружающие элементы конструкции отстоят от области фокуса на расстояния, не меньшие 30 см.

Эксперименты проводились с одиночными СВЧ-импульсами. Время между последовательными импульсами не меньше 1–2 мин. Давление воздуха атмосферного состава в камере можно устанавливать в диапазоне от $p = 1 \text{ atm} \approx 760 \text{ Torr}$ до $p \approx 3 \text{ Torr}$. Величина p контролируется с точностью $\pm 0.75 \text{ Torr}$.

В различных СВЧ-импульсах мощность ЭМ-пучка P_{MW} , т.е. поле E_0 можно варьировать. В опытах на экране осциллографа фиксируется огибающая СВЧ-импульса. Это позволяет по ее амплитуде судить об относительных величинах E_0 в различных СВЧ-импульсах. Используемый при этом детектор поля в исследуемом диапазоне варьирования E_0 является линейным.

Абсолютная величина поля, соответствующая различным амплитудам осциллограмм, определяется в специальных экспериментах по методике, изложенной в работе [10]. Для этого в фокус ЭМ-пучка помещается металлический шарик диаметром $2a = 5 \text{ mm}$. В течение СВЧ-импульса его поверхность освещается ультрафиолетовым (УФ) импульсом. Это излучение обеспечивает наличие около нее некоторого числа фотоэмиссионных электронов, которые необходимы для начала процесса СВЧ-разряда. В эксперименте при установленном неизменном E_0 определяется максимальное давление в рабочей камере p_{br} , при котором шарик в данной постановке еще может инициировать пробой воздуха. Определенная таким образом величина p_{br} при заданном размере $2a$ позволяет рассчитать амплитуду исходного поля в фокусе E_0 .

Кроме того, абсолютная величина поля E_0 , соответствующая зафиксированной амплитуде осциллограммы, оценивается и по безэлектродному неинициированному пробую воздуха. Известно [11], что амплитуда критического поля пробоя E_{cr} в СВЧ-диапазоне λ может быть рассчитана по формуле

$$E_{\text{cr}} = 42p \sqrt{1 + (\omega/v_c)^2}, \text{ V/cm},$$

где ω — круговая частота поля, $v_c = 5 \cdot 10^9 \text{ p}$; $1/\text{s}$ — частота столкновений плазменных электронов с молекулами воздуха, и давление p — имеет размерность Torr. В опытах фиксировалось максимальное давление воздуха p_{max} , при котором с данной мощностью P_{MW} он еще

пробивался. Затем по этому p_{max} и рассчитывается E_{cr} , считая, что оно примерно равно E_0 .

Методика проведения экспериментов и их результаты

Опыты начинались с максимальной мощности ЭМ-пучка P_{MW} . Соответствующая фотография огибающей СВЧ-импульса приведена на рис. 1, а. При этой мощности P_{MW} эксперимент по абсолютному измерению E_0 с помощью шарика дал $p_{\text{br}} = 270 \text{ Torr}$, что соответствует расчетному $E_0 = 4.2 \text{ kV/cm}$. С этой P_{MW} максимальное значение давления в рабочей камере, при котором в опытах еще обеспечивался безэлектродный пробой воздуха

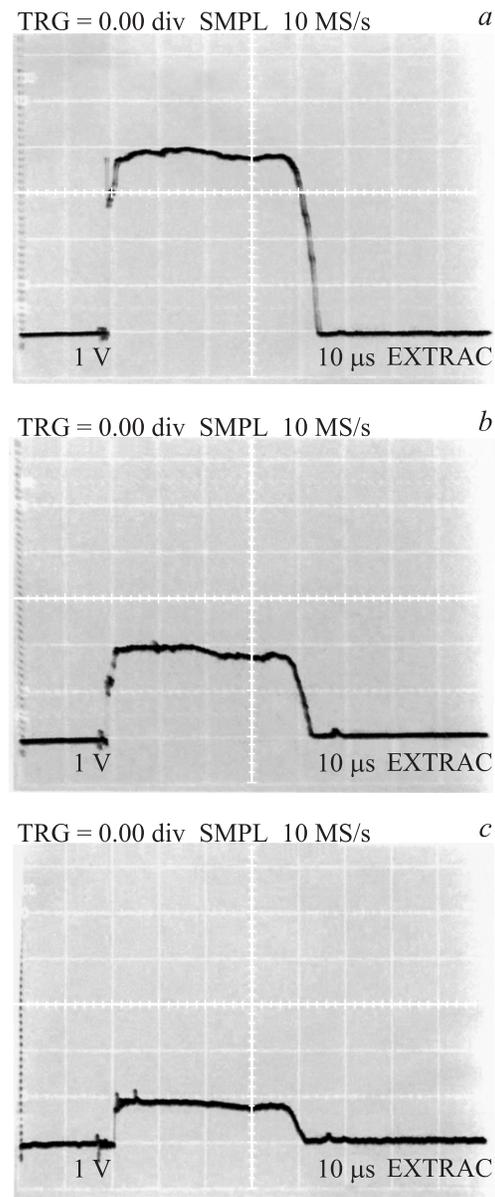


Рис. 1. Осциллограммы огибающей СВЧ-импульсов: а — $E_0 = 4.2\text{--}4.6$; б — $2.1\text{--}2.3$; в — $1\text{--}1.3 \text{ kV/cm}$.

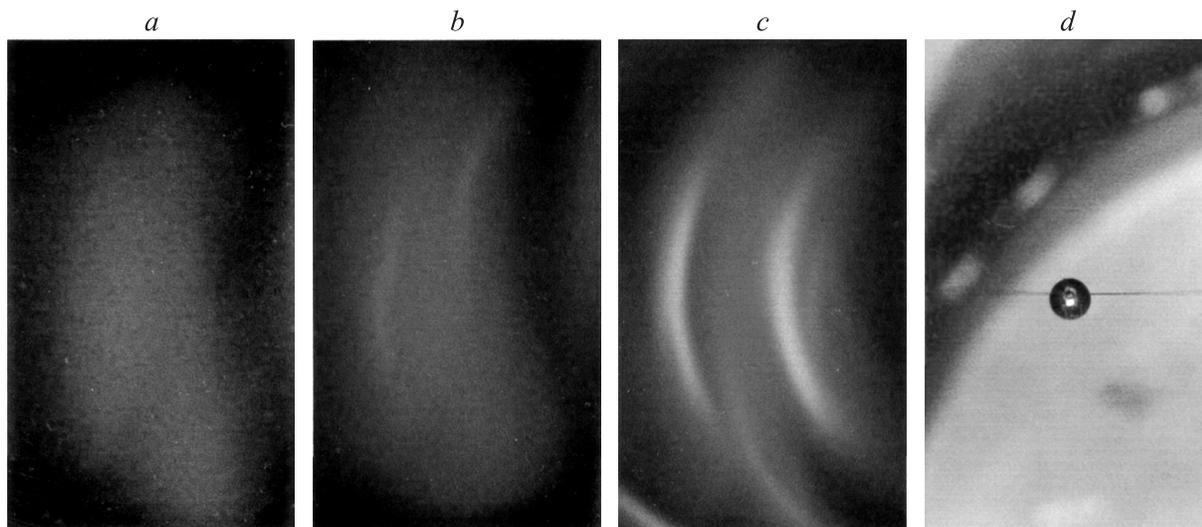


Рис. 2. СВЧ-разряд в воздухе при $p \approx p_{th}$, $E_0 = 4.2-4.6$ kV/cm.

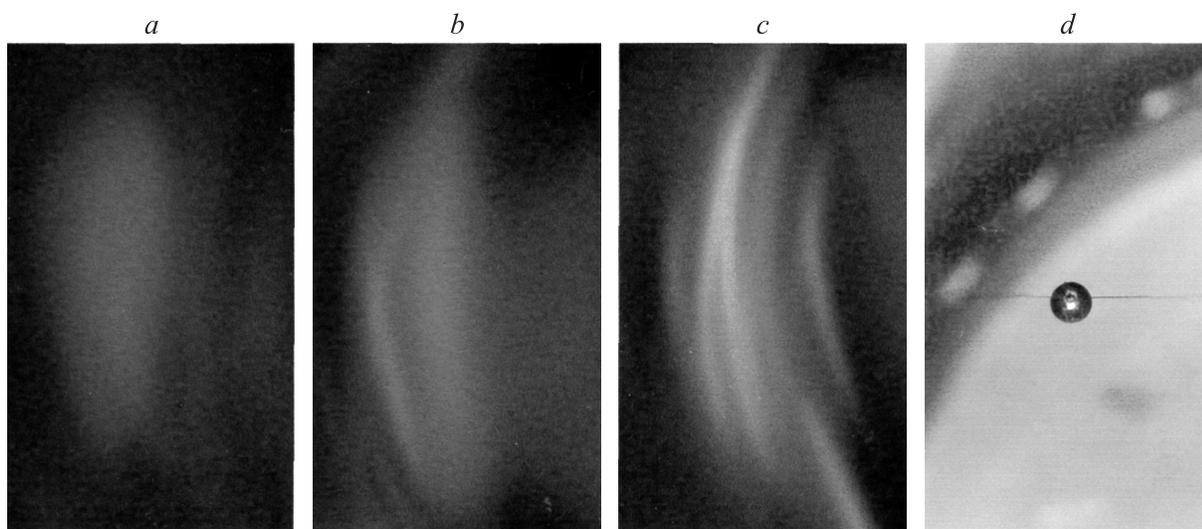


Рис. 3. То же, что для рис. 2; при $E_0 = 2.1-2.3$ kV/cm.

в фокусной области ЭМ-пучка $p_{max} = 110$ Торг. Расчет с этим p_{max} по формуле для E_{cr} дал $E_0 \approx E_{cr} = 4.6$ kV/cm. Эта величина всего примерно на 10% больше оцененного значения E_0 по эксперименту с шариком.

Далее в опытах, начиная с этого p_{max} , давление в рабочей камере перед каждым последовательным СВЧ-импульсом уменьшается на 30 Торг до $p \approx 40$ Торг. Затем шаг уменьшения p делается равным 3 Торг, и эксперименты продолжаются до $p \approx 6$ Торг.

В каждом СВЧ-импульсе при установленном p разрядная область фотографируется. Время экспозиции больше τ_{pul} . Фоторегистрация производится с направления, перпендикулярного плоскости, содержащей векторы E_0 и L . На нижеприведенных фотографиях направление излучения слева направо, а вектор E_0 — вертикален. На них же в качестве масштаба изображения помещена фотография шарика.

Полученная серия фотографий анализируется. Из этого анализа следует, что при малых p (масштаба нескольких торр) разряд является диффузным. При этом вдоль вектора L , т.е. вдоль оси ЭМ-пучка, он разбит на отдельные плазмоиды. С ростом p в плазмоиде, который находится в фокусе ЭМ-пучка, начинает фиксироваться вытянутый вдоль вектора E_0 более яркий канал. И по фотографиям находится минимальное пороговое p_{th} , при котором впервые фиксируется такой канал.

На рис. 2 в качестве примера приведены фотографии „фокального“ плазмоида при максимальной P_{MW} при $p = 9, 12$ и 15 Торг. На них видно, что при $p = 9$ Торг разряд является диффузным. При давлении $p = 15$ Торг в этом плазмоиде уже четко наблюдается два ИПН-канала. Их максимальный диаметр можно оценить величиной $2r \approx 1.7$ mm, а длину $2L \approx 20$ mm. На промежуточной фотографии при $p = 12$ Торг можно зафиксировать

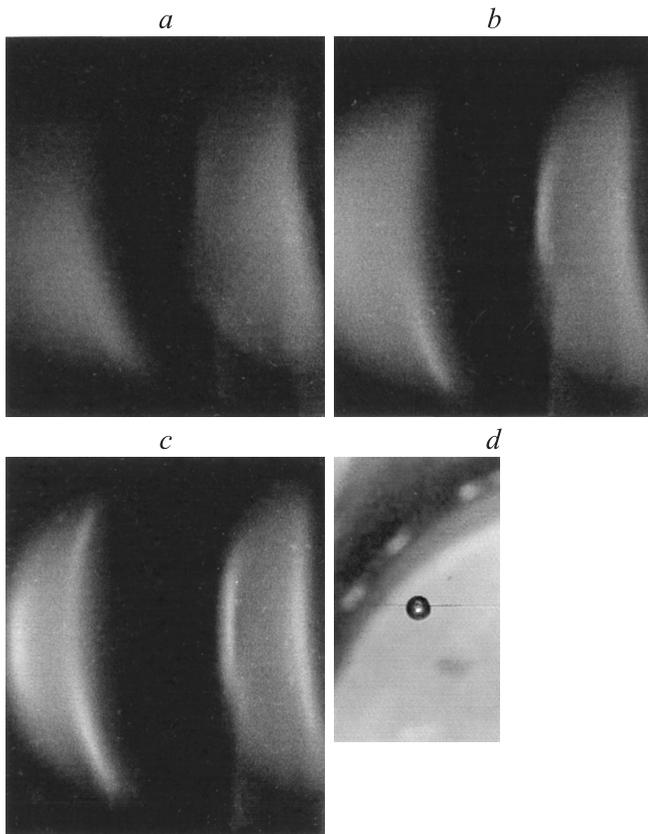


Рис. 4. То же, что для рис. 2; при $E_0 = 1-1.3$ кВ/см.

зарождение этих каналов. Таким образом, из данного эксперимента следует, что при максимально возможной в опытах амплитуде СВЧ-импульса, соответствующей $E_0 = 4.2-4.6$ кВ/см, пороговое давление возникновения ИПН $p_{th} \approx 12$ Торр.

В следующей экспериментальной серии мощность ЭМ-пучка P_{MW} уменьшается.

Соответствующая вновь установленному значению P_{MW} осциллограмма огибающей СВЧ-импульса приведена на рис. 1, *b*. Видно, что ее амплитуда уменьшилась примерно в два раза по сравнению с рис. 1, *a*. Контрольный эксперимент с инициацией СВЧ-пробоя с помощью шарика дал при вновь установленной мощности ЭМ-пучка $p_{br} = 115$ Торр. Соответствующий расчет определил амплитуду поля в фокусе величиной $E_0 = 2.1$ кВ/см. Безэлектродный неинициированный пробой воздуха в опытах осуществлялся до $p_{max} = 54$ Торр. Это давление соответствует расчетному полю $E_0 \approx E_{cr} = 2.3$ кВ/см.

В данной экспериментальной серии в опытах варьирование p началось с максимального $p = 40$ Торр. Шаг уменьшения p был равен 3 Торр.

Анализ фотографий разрядной области в данной серии также определил $p_{th} \approx 12$ Торр. На рис. 3 представлены фотографии при $p = 9, 12$ и 15 Торр.

И, наконец, в третьей серии мощность ЭМ-пучка была дополнительно уменьшена. Соответствующая этому P_{MW} осциллограмма огибающей СВЧ-импульса при-

ведена на рис. 1, *c*. Видно, что ее амплитуда уменьшилась по сравнению с рис. 1, *b* примерно в два раза. Контрольный эксперимент с инициацией СВЧ-пробоя с помощью шарика при вновь установленной мощности ЭМ-пучка дал $p_{br} = 45$ Торр. Соответствующий расчет определил амплитуду поля в фокусе величиной $E_0 = 1$ кВ/см. При этом уровне поля неинициированный пробой воздуха в опыте реализовался до $p_{max} = 27$ Торр. Расчет по формуле для критического поля пробоя дает $E_0 \approx E_{cr} = 1.3$ кВ/см.

В данной экспериментальной серии в опытах варьирование p по-прежнему началось с максимального $p = 40$ Торр, с шагом в 3 Торр.

При таком малом уровне поля в опытах произошли некоторые изменения — СВЧ-разряд при варьировании давления в районе p_{th} реализуется только в двух фокусных максимумах поля. При этих p разрядный фронт не „бежит“ навстречу ЭМ-излучению.

Характерные фотографии разрядной области при данном уровне поля при $p = 15, 18$ и 24 Торр приведены на рис. 4. На них видно, что при $p = 15$ Торр оба фокусных плазмоида являются еще практически диффузными. Некоторый зачаток ИПН-канала наблюдается лишь в правой нижней области левого плазмоида, он более четок при $p = 18$ Торр. Кроме того, при этом давлении и около левой границы правого плазмоида также намечается вытянутый вдоль E_0 яркий канал. Эти каналы очень четко видны на фотографии, соответствующей $p = 24$ Торр. Таким образом, при $E_0 = 1-1.3$ кВ/см пороговое давление возникновения ИПН $p_{th} \approx 15$ Торр.

В опытах дальнейшее уменьшение P_{MW} не производилось, так как величина E_0 в последней экспериментальной серии уже близка к полю E_{cr} , соответствующему фиксируемому давлению p_{th} .

Заключение

Таким образом, при экспериментальной длине волны ЭМ-излучения $\lambda = 8.9$ см в исследуемом диапазоне варьирования E_0 от примерно 4.5 до 1 кВ/см практически вне зависимости от величины E_0 в плазме безэлектродного свободно локализованного надкритического СВЧ-разряда в воздухе при его давлении p , большем некоторого граничного давления $p_{th} = 12-15$ Торр, начинает развиваться ионизационно-перегревная неустойчивость. Эти опытные данные могут быть использованы для развития теории данного вида неустойчивости СВЧ-разрядной плазмы.

Результаты экспериментов по определению для фиксированных значений поля E_0 максимальных давлений воздуха, при которых реализуется его безэлектродный СВЧ-пробой — p_{max} , или пробой, инициированный металлическим шариком — p_{br} , дали хорошие взаимные количественные согласия. Они не противоречат и данным относительных измерений поля E_0 . Это позволяет констатировать, что приведенные в работе [10] и используемые в расчетах формулы для оценки значений

кинетических коэффициентов, характеризующих элементарные процессы в СВЧ разрядной воздушной плазме, адекватны физической реальности.

В дальнейших исследованиях в переходной области между диффузным и стримерным видами СВЧ-разряда необходимо, прежде всего экспериментально, определить граничные E_0-p условия удлинения начальных ионизационно-перегретных каналов и условия, обеспечивающие их выход из начального плазменного диффузного образования, т.е. пороговых условий процесса формирования СВЧ-стримеров.

Список литературы

- [1] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 2. С. 389–391.
- [2] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 10. С. 149–154.
- [3] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 32–45.
- [4] Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V. // 5th Int. Workshop on Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications. Moscow, 2003. P. 69–75.
- [5] Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V. et al. // 43rd AIAA Aerospace Sci. Meet. and Exhibit. 10–13 January 2005. Reno, Nevada. Paper AIAA 2005–989.
- [6] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 76. Вып. 11. С. 52–60.
- [7] Гильденбург В.Б., Ким А.В. // Физика плазмы. 1980. Т. 6. Вып. 4. С. 904–909.
- [8] Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 3. С. 1–6.
- [9] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыленков В.В. Препринт МРТИ АН СССР „Установка для исследования импульсного безэлектродного СВЧ-разряда в газах высокого и среднего давления“. М., 1990. 14 с.
- [10] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 3. С. 411–415.
- [11] Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969. 212 с.